

橋梁構造断面の空力ガスト過渡応答特性に関する研究

白石 成人・松本 勝・加藤 隆
白土 博通・松村 修一

A STUDY ON AERODYNAMIC TIME HISTORY RESPONSE CHARACTERISTICS OF BRIDGE CROSS SECTIONS DUE TO GUST

By *Naruhito SHIRAISHI, Masaru MATSUMOTO, Takashi KATOH,*
Hiromichi SHIRATO and Shuichi MATSUMURA

Synopsis

This study is concerned with the induced mechanism of torsional buffeting oscillation of the basic structural H-shape section due to turbulent flow, which generally tends to generate typical torsional flutter phenomenon. The aerodynamic pitching moment for H-shaped cross section is also measured in sinusoidally fluctuating flow to obtain the equivalent Küssner function experimentally. This function indicates fairly good agreement with the equivalent Wagner function as the result of comparison of indicial response curves and of time history response analysis. Subsequently the torsional buffeting characteristics can be said to be evaluated to large extent from the torsional unsteady force characteristics in smooth flow.

1. ま え が き

近年耐風工学の分野で、渦励振動およびパフエッティング（風の乱れによる不規則振動）など低風速域における空力振動現象に対する議論が内外で活発に行なわれているが、吊橋等、振動の生じやすい構造物を対象とした場合の耐風設計へこれらの空力振動現象に対する安全性をどのような形で盛り込むかは、未だ問題とされる点が多く残されているのが現状である。

長大橋梁構造物上部工のパフエッティングに関しては、A. G. Davenport¹⁾の研究が知られている。Davenport は吊橋の横たわみ振動に着目し、定常統計解析により、各節点の変位のパワースペクトルを求め、さらに Cartwright-Higgins の極値分布理論を用いて変位の最大応答期待値を求めている。この手法は、入力となる主流方向変動風速を定常確率過程とみなし、周波数領域で解析を進めているが、最近の橋梁構造物の長大化・長周期化に伴ない、一定の評価時間内に風速・風向が大きく変化する非定常 (non-stationary) 性の強い強風（たとえば台風のような強風）が、これらの長周期構造物に作用する場合に、従来の周波数解析では十分把握できず、これらの非定常性をも加味した振動応答評価についての研究が急がれている。時間過渡応答解析 (Time History Analysis) は、以然未解決の問題が残されているものの、非定常な入力に対する解析も理論的には可能であり、また周波数領域とは Fourier 変換の対であるという特性をふまえ、現在までに数多くの報告がなされてきた。

本研究は、従来の研究結果²⁾から橋梁基本断面に固有な空力関数を風洞実験より推定し、これをもとに断面固有の空力発生機構について若干の考察を加えるとともに、自動空気力および強制空気力に対する空力インディシャル応答関数（等価 Wagner 関数、等価 Küssner 関数）相互の比較を行なうことにより両者の

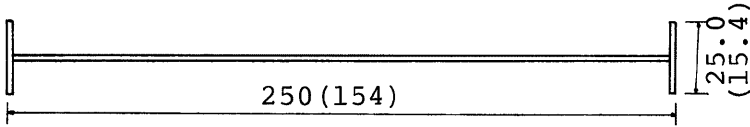


Fig. 1. Shape of H cross section.

関連性について考察する。さらに、これらの空力関数を時間過渡応答解析に応用し、その応答特性に対する検討もあわせて行なうものである。なお本研究は、現在本州四国連絡橋として計画あるいは建設途中にある吊橋トラス補剛桁に発生し得る空力ねじれフラッタ振動と同じタイプのねじれフラッタが生じやすい H 型断面（桁高と幅員の比は 1 : 10）のねじれ振動に関連する pitching moment を対象とした。Fig. 1 に風洞実験に使用した二次元剛体模型および小型模型の断面形状を静す。ただし図中（ ）内が小型模型の寸法である。

2. 空力インディシャル応答関数

文献²⁾において筆者らは議論を二次元に限定したなかで各種橋梁基本断面固有に、鉛直変動風速とそれに起因する発生空気力 (lift force, pitching moment) を対応づける周波数応答関数（二次元空力システム関数）および空力衝撃応答関数、空力インディシャル応答関数の形状を 4 種のパラメータ a, b, c, d で表わす手法を提案した。

これらの空力関数のうち二次元空力システム関数は、時間原点を断面の leading edge より mid point (幅員中央点) へ移せば、薄翼に対して理論的に得られた Sears 関数³⁾と等価なものとなり、また空力インディシャル関数は時間原点を断面の leading edge とした場合に Küssner 関数⁴⁾と等価であることが知られたが、風洞実験より推定された各空力関数は、断面によってはこれら薄翼に対する空力関数と非常に異なる独特な関数形状を示す結果を得た。

薄翼の空力インディシャル応答関数には、前述の Küssner 関数のほか、Wagner 関数⁴⁾が知られている。両者の関数形状を Fig. 2 に示す。前者がステップ状の変動気流 (Sharp edge gust) に対する揚力 (強制空気力) 発生時の時間過渡状態を表わすもので、相対迎角は断面の leading edge より trailing edge に至るまでその変化に時間的な差を有するのに対し、後者は、ステップ状の姿勢変化に対する揚力 (自励空気力) 発生

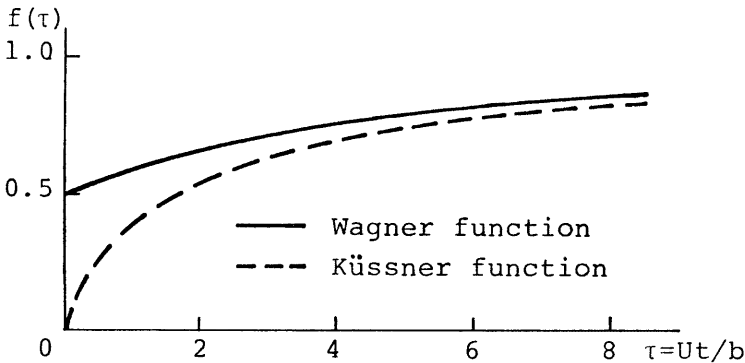


Fig. 2. Shape of aerodynamic indicial functions for thin airfoil.

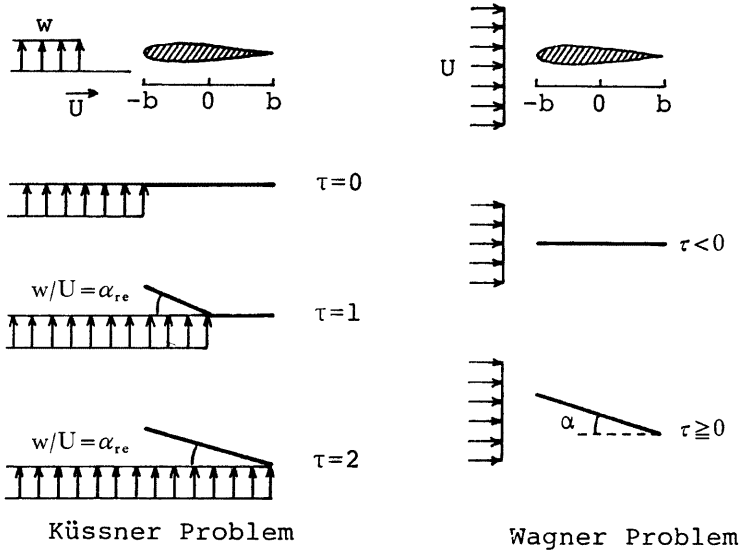


Fig. 3. Angle of attack.

の時間過渡状態を表すもので、相対迎角変化は幅員方向の時間差を有しない。(Fig. 3. 参照)

いま、主流風速 U をしだいに大きくすれば Küssner 関数における迎角変化の時間差は小さくなる。したがってこの時間差が充分無視し得る高風速域では、Küssner 関数と Wagner 関数との間に密接な関連があるものと考えられる。これは、二次元空力システム関数の立場より考えれば二次元鉛直変動気流による幅員方向の相対迎角が一様な分布に近づくこと、換言すれば二次元鉛直変動気流の波長が幅員に比べて充分大であること、すなわち

$$k \ll \pi \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし、 k : 換算振動数 $k = b\omega/U$

b : 断面半幅員

ω : sinusoidal に変化する二次元鉛直変動気流の円振動数

の領域で Küssner 関数と Wagner 関数の関連性が議論できるものと考えられる。

3. 風洞実験および実験結果

3.1 風洞実験

上記に述べた目的および若干の考察に対し、本研究では以下 (1)~(4) に示す風洞実験を行なった。なお、使用風洞は、京都大学工学部土木工学教室内に設置されたエッフェル型風洞であり、風速は 0~20 m/sec にわたり連続的に変化が可能である。測定範囲は通常、高さ約 1.5 m、幅約 2.5 m、気流の流下方向約 8.0 m にわたるが、後述の二次元剛体模型パネ支持実験では、模型支持部等による気流の剝離を防ぐ目的で風洞内に導風壁を設けるため、測定可能高さは約 1.0 m である。

(1) 静的空気力係数測定実験

小型模型をロードセルに鉛直に片持支持し、ターンテーブルに固定し、 $-16^\circ \sim +16^\circ$ の各迎角について一様流中での静的空気力を測定した。使用機器は以下のとおりである。

- ・ベッツ型マノメータ (理化精機工業 (株))
- ・ロードセル (LMC 3501-0.5 NISSHO ELECTRIC WORKS CO. LTD.)
- ・動歪計 (DA 6/MTX 型 新興通信工業 (株))
- ・直流アンプ (6 L 5 SANEI INSTRUMENT CO. LTD.)
- ・ローパスフィルター (E 3201 型 NF CIRCUIT DESIGN BLOCK CO. LTD.)
- ・ペン書きレコーダ (WTR 281 WATANABE INSTRUMENTS CORP.)

(2) 二次元空力システム関数測定実験

(1) で設置した模型の上流約 2.3 m に 2 枚翼 (NACA 0012, 長さ 93 cm, 弦長 30 cm, 間隔 30 cm) を設置し, 油圧加振機でねじれ振動を与えることにより, 風洞内に正弦波に比較的近い二次元変動気流を発生させ, これに起因する変動空気を測定した。その測定波形記録の一例を Fig. 4 に示す。なお設定平均風速は, 2.02 m/sec., 3.88 m/sec., 4.91 m/sec. の 3 種類とした。また二成分熱線風速計測定端子 (X 型プローブ) を模型断面の leading edge に先端を一致させて設置し, 鉛直変動風速を測定した。使用機器は (1) で用いたもののほかに下記のものを用いた。

- ・二成分熱線風速計 (21-1211, 21-1711, 21-1311, 日本科学工業(株))
- ・演算器 (28-6411, 日本科学工業 (株))
- ・データレコーダ (TEAC R 280)

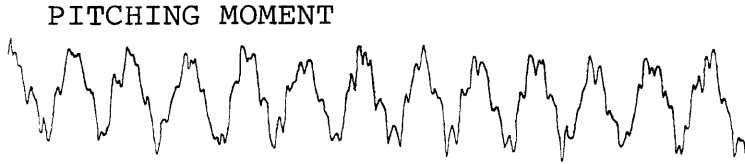


Fig. 4. Sample of measured record in wind tunnel test.

(3) 無次元非定常空力係数 A_0^* 測定実験

二次元剛体模型を, 導風壁を設けた風洞内にパネ支持し, 一様流中における自由振動実験を行ない, 各設定風速における対数減衰率を測定した。なお, 振動系はねじれ-自由度系に拘束した。使用機器は (1) と同一である。(ロードセルを除く。)

(4) 変動風速および振動応答測定実験

(3) で設置した模型の上流約 2.4 m に 16 枚加振翼 (NACA 0012, 長さ 97 cm, 弦長 20 cm, 間隔 12 cm) を設置し, 油圧加振機により, ねじれのランダム加振を与え, 風洞内に二次元ランダム気流を発生させた。ま

Table 1. Experiment conditions of wind tunnel test.

	Symbol	Dimension	
Span length	l	m	0.93
Half chord length	b	m	0.125
Inclination of pitching moment coefficient	$\frac{dC_M}{d\alpha}$		-0.208
Moment of inertia (per unit span length)	I	kg·sec ²	0.003718
Natural frequency (torsion)	f_0	cps.	5.056
Logarithmic damping decrement (torsion)	δ_0		0.01875

た変動風速は、二成分熱線風速計測定端子を、(2) 同様、断面の leading edge にその先端を一致させた状態で測定した。なお、設定迎角は 0° であり、使用機器は (2) と同一である。(ロードセルを除く。) Table 1 に模型の実験条件を示す。

3.2 実験結果

Fig. 5 に pitching moment についての静的空気力係数を示す。

Fig. 6, Fig. 7 は二次元空力システム関数のゲイン特性および位相時性を表わし、図中○, ●, ⊙の各印は実験値を示す。なお Fig. 7 において各印の近傍に記された数字は、各実験値に対する換算振動数の値を表わす。また両図中実線 (A) はこれらの実験値をもとに推定した近似曲線である。二次元空力システム関数は、 $k=0$ の場合理論的には準定常値 1.0 を示すが、Fig. 6 において換算振動数 k が 0 に近い領域では近似曲線に比べ実験値が小さめの値を示している。これは Fig. 7 にも反映され、各実験値が近似曲線に比べて原点に近寄った位置に表わされている。これは人力となる鉛直変動風速の低換算振動数成分の振幅が断面の leading edge から trailing edge へ移行するにつれて小さくなる⁵⁾、いわゆる幅員方向の低減を考慮していないこと、および乱流中の静的空気力係数勾配が一様流中の場合より小さい値を示すこと⁶⁾等の理由によるものと考えられる。Fig. 6 および Fig. 7 に示す破線 (B) は、以上のことから考慮し、より正確に実験値を近似すべく再度推定しなおしたものである。

Fig. 8 は、二次元空力システム関数近似曲線より求められた pitching moment についての空力インディシャル応答関数である。図中一点鎖線 (A) は、Fig. 6, Fig. 7 における近似曲線 (A) より求められた等価 Küssner 関数であり、破線 (B) は同じく近似曲線 (B) より求められた等価 Küssner 関数である。

前節 3.1(3) において得られた各風速に対する系の対数減衰率 δ を用い、無次元非定常空気力係数 A_2^* は次式

$$A_2^* = \frac{I}{\pi \rho b^4} (\delta_0 - \delta) \dots\dots\dots (3.1)$$

- ただし、 I : 単位スパン長あたりの質量慣性モーメント
- ρ : 空気密度
- δ_0 : 系の初期減衰率

より求められる。ただし、ここでは無風時の系の固有振動数と同様流中の系の固有振動数がほぼ等しいという条件を用いている。Fig. 9 にその結果を示すが、図中○印は実験値を表わす。実験では換算風速 $U/b\omega_s = 0.5$ 付近で渦励振動と思われる定常振幅振動が発現し、ためにこの領域で A_2^* が一度正のピークをとった後に大きく負側に移行している。図中一点鎖線で示した近似曲線 II は換算風速 1.0 付近に注目して近似したものであるが、この領域では前述の渦励振動の影響を強く受けているものと判断されること、および無次元非定常空気力係数 A_2^* より等価 Wagner 関数を推定するためには、自励空力の作用によるねじれフラッタが卓越していると考えられる高換算風速域に近似精度の力点をおく必要があること、さらには第 2 章で述べたように、等価 Küssner 関数と等価 Wagner 関数とは式 (2.1) で表わされる低換算振動数領域で、その関連性の議論が意義のあるものとなることなどから判断し、本研究では、等価 Wagner 関数の推定に際し近似曲線 I を用いることとした。なお推定方法は R. H. Scanlan⁷⁾ 等により提案された手法を用い、得られた等価 Wagner 関数は Fig. 8 に実線で示した。これらの結果は、中村、吉村⁵⁾ により報告されている結果と比較的良好一致をみている。これら Fig. 8 に示す空力インディシャル関数について注目すべきは、いずれも初期に風の作用方向あるいは変位の向きとは逆符号の空気が発生した後時間の経過に伴ない準定常値 1.0 へ漸近するという似かよった関数形状を示しており、自励空力と強制空力という全く異なる内容を表わす等価 Wagner 関数と等価 Küssner 関数が非常によく似た時間過渡特性を示す点であり、H 型断面の pitching moment に関して、両者の空力発生機構の間には密接な関連性が存在するものと考えられる。

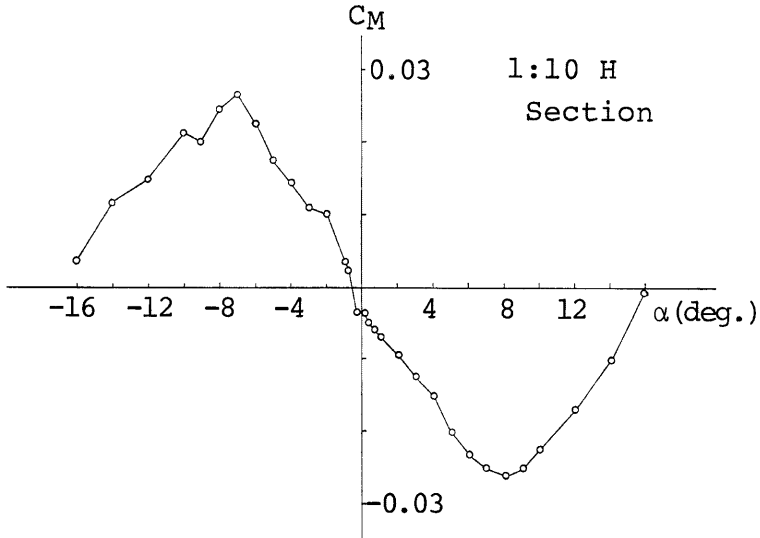


Fig. 5. $\alpha-C_M$ diagram.

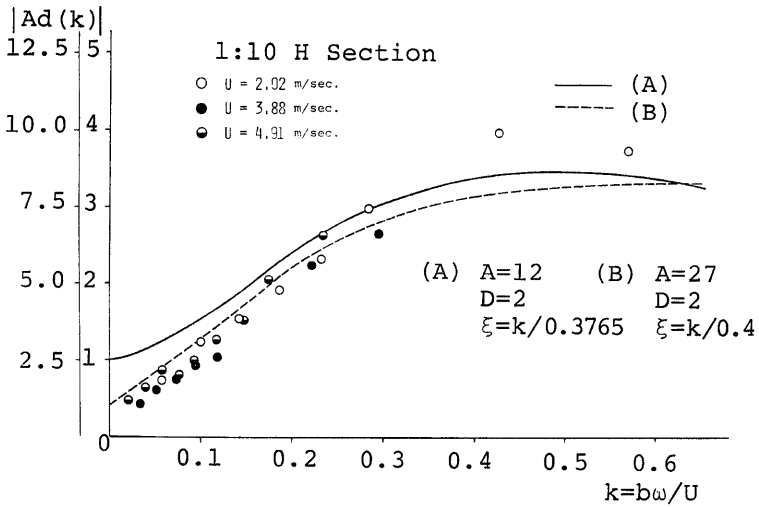


Fig. 6. Gain characteristics of aerodynamic system function.

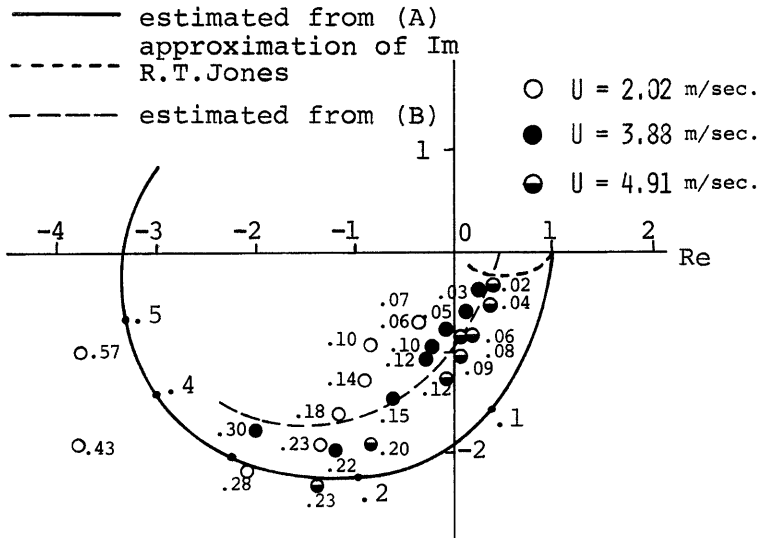


Fig. 7. Phase characteristics of aerodynamic system function.

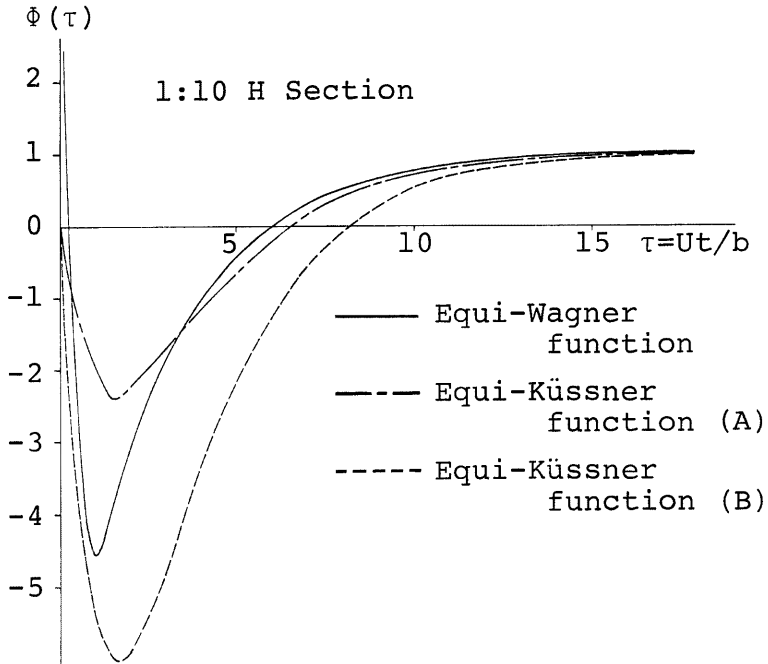


Fig. 8. Aerodynamic indicial functions.

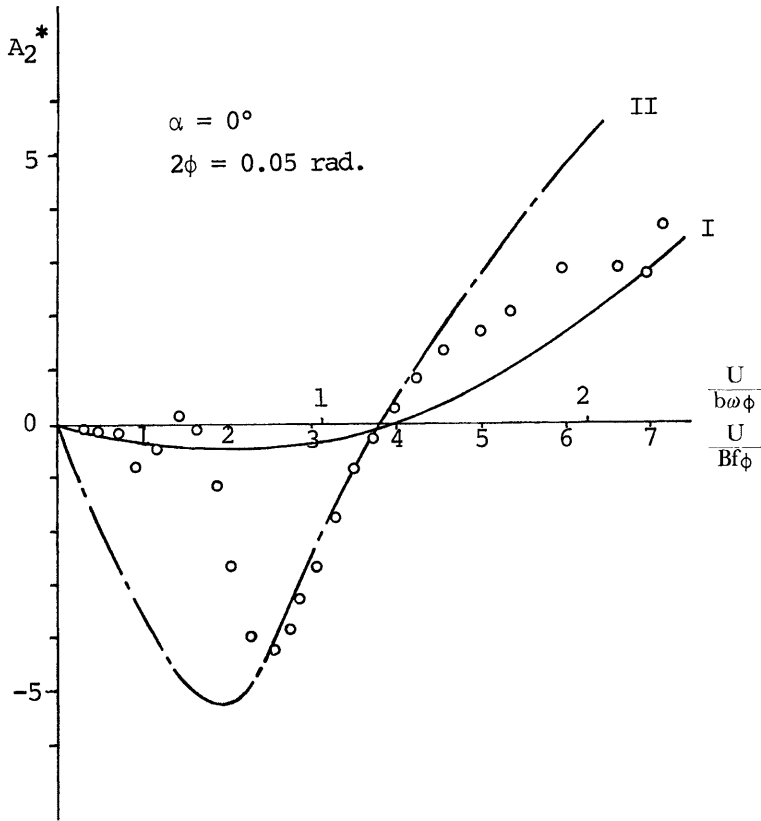


Fig. 9. Reduced wind velocity — A_2^* curve.

4. 時間過渡応答解析

本章は、風洞実験より推定した等価 Küssner 関数を実際の時間過渡応答解析に用い、3.1.(4)で測定された実測応答との比較を行なうとともに、発生空気力の時間過渡特性を考慮しない準定常空力システム関数による解析結果との比較から、等価 Küssner 関数のもつ非定常 (unsteady) 特性について若干の考察を試みる。さらに等価 Wagner 関数を強制空気力に関するガスト空力インディシャル関数と考え、同一の応答解析を行なった結果より、3.2で述べた等価 Wagner 関数と等価 Küssner 関数が応答にどのような形で反映されているかを検討するものである。

4.1 時間過渡応答解析手法

単位スパン長あたりの強制空気力 $M(\tau)$ は、等価 Küssner 関数 $\psi_M(\tau)$ を用いた場合次式 (4.1) に示す形で表わされる。

$$M(\tau) = 2\rho b^3 U^2 \frac{dC_M}{d\alpha} \int_0^\tau \frac{w(\sigma)}{U} \frac{d\psi_M(\tau-\sigma)}{d\sigma} d\sigma \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし、 $\frac{dC_M}{d\alpha}$ ：静的空力係数勾配
 $w(\sigma)$ ：鉛直変動風速

また等価 Wagner 関数 $\Phi_{MO}(\tau)$ を用いた場合には、次式 (4.2) に示す形で表わされる。

$$M(\tau) = 2\rho b^2 U^2 \frac{dC_M}{d\alpha} \left\{ \frac{1}{U} \frac{dw(\tau)}{d\tau} \cdot C_0 + \frac{w(\tau)}{U} \Phi_{MO}(0) + \int_0^\tau \frac{w(\sigma)}{U} \frac{d\Phi_{MO}(\tau-\sigma)}{d\sigma} d\sigma \right\} \dots\dots\dots (4.2)$$

ただし、 C_0 ：等価 Wagner 関数推定パラメータ（脚注参照）

準定常空力システム関数は、全換算振動数にわたり準定常値 1.0 をとるものであり、したがって空力インディシャル関数は unit step function となるため pitching moment $M(\tau)$ は次式 (4.3) のようになる。

$$M(\tau) = 2\rho b^2 U \frac{dC_M}{d\alpha} w(\tau) \dots\dots\dots (4.3)$$

さらに pitching moment $M(\tau)$ よりねじれ応答 $\varphi(t)$ は再度 Duhamel 積分を実行し、初期条件を無視すれば次式 (4.4) より求めることができる。

$$\varphi(t) = \int_0^t h_M^*(t-t') M(t') dt' \dots\dots\dots (4.4)$$

ただし、 $h_M^*(t) = \frac{1}{I\omega} e^{-\zeta\omega_0 t} \sin \omega t$ 単位衝撃応答関数

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1-\zeta^2} = \omega_0$$

ζ ：系の減衰定数

ω_0 ：系の固有円振動数

空力減衰は、乱れが及ぼす影響について未だ明らかにされていない点が多いが、時間過渡特性の強い非定常 (unsteady) な断面を対象としているため、準定常理論によるものは用いず、無次元非定常空力係数 A_2^* により求められたもの、および実測応答の自己相関係数をとり、その包絡線より求められたもの（空力減衰と構造減衰の和）の 2 種類を用いた。なお等価 Küssner 関数、準定常空力システム関数による応答解析には上記 2 種類の減衰を、等価 Wagner 関数による応答解析には無次元非定常空力係数 A_2^* により得られるもののみを用いた。

4.2 応答解析結果および考察

Fig. 10-1 および Fig. 10-2 に応答解析結果の一例を示す。各解析結果は応答振幅の点で実測応答との間に差が見られるが、これは空力減衰の評価に以然問題があることが第一の理由として考えられ、今後これらの研究が必要であるものと判断される。

準定常空力システム関数による応答と、等価 Küssner 関数による応答を比較すると、同一の減衰定数を用いた場合であっても、前者の方が振幅が小さく、これは Fig. 6 に示した二次元空力システム関数ゲイン特性が準定常値 1.0 を大きく越えることにより、準定常力システム関数を用いた場合、空力が過小評価されるためと考えられる。また、応答のピークの位置について、準定常空力システム関数による場合と、等価 Küssner 関数による場合とで時間のなずれが認められる。たとえば時刻 $t=10 \text{ sec}$. 付近に現われている負のピークは、後者が前者に比べて約 0.4 sec. ほど遅れているが、これは等価 Küssner 関数のもつ過渡特性によるものと考えられる。以上の応答特性を実測応答と比較すれば、等価 Küssner 関数すなわち二次元空力システム関数は準定常空力システム関数に比較し、より忠実に応答を記述し得るものと判断される。

また等価 Wagner 関数を用いた応答では、この関数が $\tau=0$ で 0 以外のある値を示すことより、これによる空力が付加されるために等価 Küssner 関数を用いた応答に比較し、振幅が大きく現われているものの、

脚注：文献 7) によれば、 $C_0 = \frac{1}{2} [\Phi_{MO}(0) - 1]$ であり、等価 Wagner 関数の Component である Delta 関数の係数を表わす。

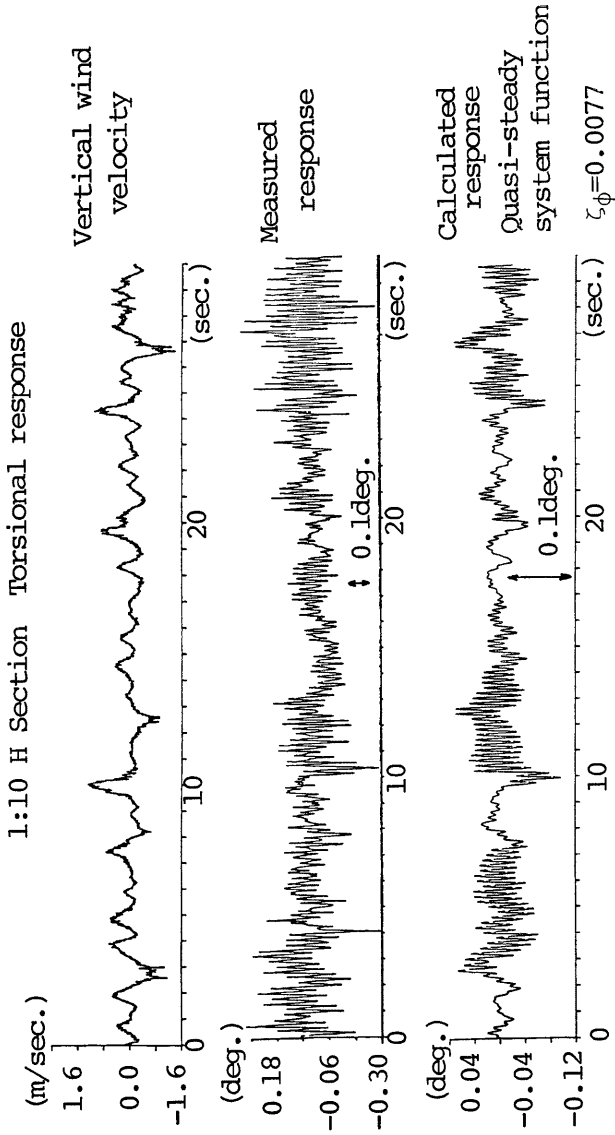


Fig. 10-1. Time history analysis.

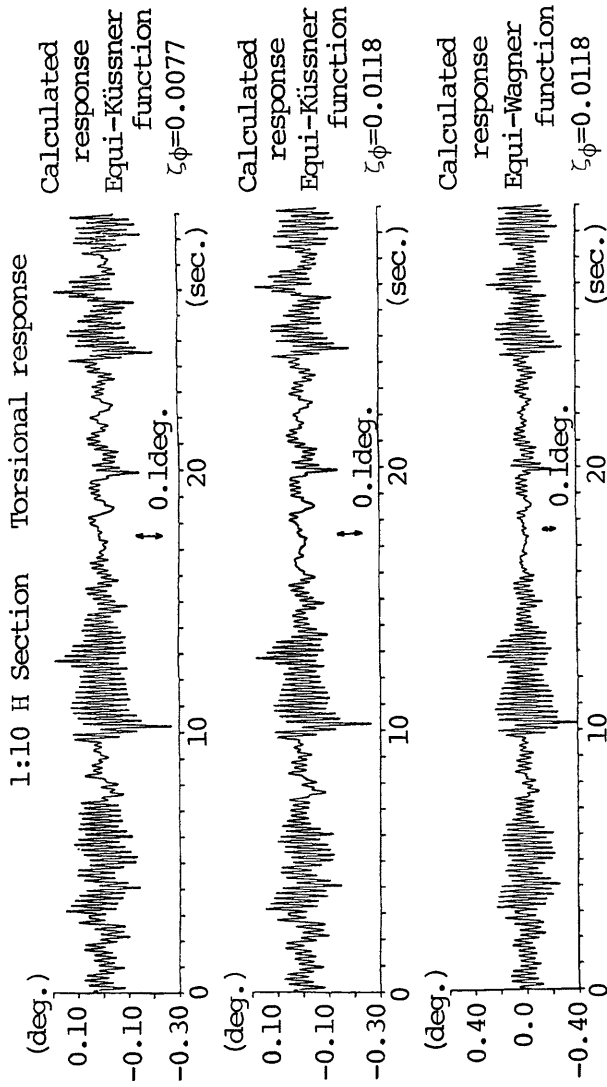


Fig. 10-2. Time history analysis.

波形、ピークの位置等は等価 Küssner 関数による応答同様、実測応答と比較的良好な一致をみており、これら空力インディシャル関数の関連性が振動応答にも反映されているものと考えられる。

5. む す び

以上の実験ならびに解析結果をとりまとめれば、H 型断面の pitching moment の発生機構について次のことが言えるものと思われる。

1) 等価 Wagner 関数と等価 Küssner 関数との間には、その関数形状に強い相似性が認められ、H 型断面の pitching moment の発生機構に対し、自励空気力と強制空気力との間に密接な関連性があるものと判断される。また等価 Küssner 関数に比較し、推定が容易な等価 Wagner 関数は、強制空気力に対する空力インディシャル応答と考え、気流の乱れに対する時間過渡応答解析に利用しても結果に大きな差は生じないことが明らかとなった。

2) 等価 Küssner 関数を用いた時間過渡応答解析結果は、空力減衰の評価に問題が残されているものの、実測応答との間に良好な一致を見た。したがって二次元空力システム関数は空気力発生機構とりわけその非定常 (unsteady) 特性をよく表わすものと考えられ、等価 Küssner 関数を指数関数の代数和で近似する手法は工学的に意味のあるものと思われる。

さらに、今後スパン方向へ概念を拡張した時間過渡応答解析手法や、非定常 (non-stationary) 入力に対する計算手法の確立、さらにはモデル台風についての研究が課題と考えられるが、同時に自然風や実橋の振動応答等の実測データの集積にも努力を払う必要があるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) Davenport A.G.: "A Statistical Approach to the Treatment of Wind Loading of Tall Masts and Suspension Bridges", ph. D. Dissertation, Univ. Bristol, March, 1961
- 2) 白石成人, 松本 勝, 小川哲治, 加藤 隆: "自然強風に対する長大橋梁の空力不規則応答特性に関する研究" 京都大学防災研究所年報第22号 B-2, pp. 37-47
- 3) Sears W.R.: "Some Aspects of Non-Stationary Airfoil Theory and Its Practical Applications", JAS, Vol. 8, No. 3, 1941, pp. 104-108
- 4) Bisplinghoff R. L., Ashley H. and Halfman R. L.: "Aeroelasticity" pp. 281-288
- 5) 河島祐男 他: "調和的に変動する風に関する研究" 構造物の耐風性に関する第 1 回シンポジウム論文集 1970 pp. 243-249
- 6) Wen-Hwang Lin: "Forced and Self excited Response of a Bluff Structure on a Turbulent Wind", Ph. D. Dissertation, Princeton Univ., December, 1970
- 7) Scanlan R.H., Beliveau J.G., and Budlong K.S.: "Indicial Aerodynamic Functions for Bridge Decks" Journal of the Engineering Mechanics Division, 1974, pp. 657-672
- 8) 中村泰治, 吉村 健: "インディシャル応答による構造断面のねじりフラッタの研究", 土木学会論文報告集 第264号, 1977年 8月